

# MICRORRED DE LABORATORIO PARA LA EMULACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS

*Línea Temática [1]: Redes Inteligentes / Medida Inteligente / Microrredes*

*Guillem Vinyals Canal, Andreu Vidal Clos, Gerard Clariana Colet, Eduardo Prieto Araujo, Roberto Villafáfila Robles, Oriol Gomis Bellmunt, Antoni Sudrià Andreu*

Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC), Departament d'Enginyeria Elèctrica, Universitat Politècnica de Catalunya EU d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, C. Comte d'Urgell, 187, Pl. 1, 08036 Barcelona, España. [guillem.vinals.canal@citcea.upc.edu](mailto:guillem.vinals.canal@citcea.upc.edu), [josep.andreu.vidal@citcea.upc.edu](mailto:josep.andreu.vidal@citcea.upc.edu), [gerard.clariana@citcea.upc.edu](mailto:gerard.clariana@citcea.upc.edu), [eduardo.prieto-araujo@citcea.upc.edu](mailto:eduardo.prieto-araujo@citcea.upc.edu), [roberto.villafafila@citcea.upc.edu](mailto:roberto.villafafila@citcea.upc.edu), [gomis@citcea.upc.edu](mailto:gomis@citcea.upc.edu), [sudria@citcea.upc.edu](mailto:sudria@citcea.upc.edu)

## RESUMEN

*A continuación se describe el desarrollo de una microrred de laboratorio que permite desarrollar una gran variedad de experimentos relacionados con la integración de recursos energéticos distribuidos en la red eléctrica. Su estructura se basa en la interconexión de tres sistemas de emulación programables, los cuales se pueden configurar de forma que actúen como elementos de generación, almacenamiento o cargas. Esta configuración permite realizar un gran número de experimentos simplemente modificando la programación del sistema, siendo una herramienta muy útil durante el desarrollo de nuevas soluciones.*

*Palabras clave: Microrred, recursos energéticos distribuidos, gestión de la energía, integración a red, emuladores*

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de microrred se define como una instalación que incluye un conjunto de generadores y cargas operados como una entidad controlable, la cual es capaz de suministrar potencia eléctrica y térmica a escala local (Lasseter, 2002). Dicho concepto ha ido evolucionando desde su aparición para incorporar otros elementos como el almacenamiento (Basak et. al, 2013) o funcionalidades avanzadas como el funcionamiento en isla. A nivel general, las microrredes se pueden entender como sistemas que pueden incorporar una gran cantidad de dispositivos de muy variada naturaleza, los cuales deben que ser controlados y coordinados de forma adecuada.

La aparición de este nuevo concepto, ha promovido durante los últimos años el desarrollo de múltiples proyectos. A nivel experimental, se han construido un importante número de microrredes (Lidula & Rajapakse, 2011) para investigar nuevas soluciones en relación a su control, operación, protección, gestión de la energía, comunicaciones, entre otros aspectos. A modo de ejemplo, el proyecto *CERTS (Consortium for Electrical Reliability Technology Solutions) Microgrid laboratory Project* (Lasseter et. al. 2011), construyó una microrred a gran escala con el objetivo de demostrar que es posible realizar de forma adecuada la integración a red de sistemas de generación distribuida. A una escala menor, a nivel de laboratorio, la microrred propuesta por IREC (*Institut de Recerca en Energia de Catalunya*) (Ruiz-Alvarez, 2012), basa su funcionamiento en dispositivos emuladores programables, hecho que incrementa las posibilidades de experimentación del sistema.

En este trabajo se presenta una microrred de laboratorio que permite realizar experimentos a una potencia reducida. El principal objetivo del proyecto es crear un sistema completo, flexible, seguro, escalable, expandible y de dimensiones reducidas, para que pueda ser utilizado en un laboratorio o en una red real, para experimentar con nuevas soluciones dentro del campo de las microrredes. Estos requisitos de diseño, se concretaron en la

implementación de una microrred de laboratorio de dimensiones reducidas, basada en tres sistemas de emulación programables, que permiten representar una gran variedad de recursos y escenarios distintos.

## 2. LA ESTRUCTURA DE MICRORRED

Partiendo del concepto de microrred general expuesto en la introducción, es posible construir una gran variedad de topologías. La Figura 1 muestra una de las posibles configuraciones, donde se interconectan recursos energéticos distribuidos: generación, almacenamiento y cargas, coordinados mediante un controlador central que actúa como gestor de energía. Esta topología se considera la base sobre la cual se ha desarrollado la microrred experimental basada en elementos emuladores que reproducen el comportamiento de elementos reales. Antes de exponer la estructura y funcionamiento de la plataforma experimental, se introduce el concepto de emulador.

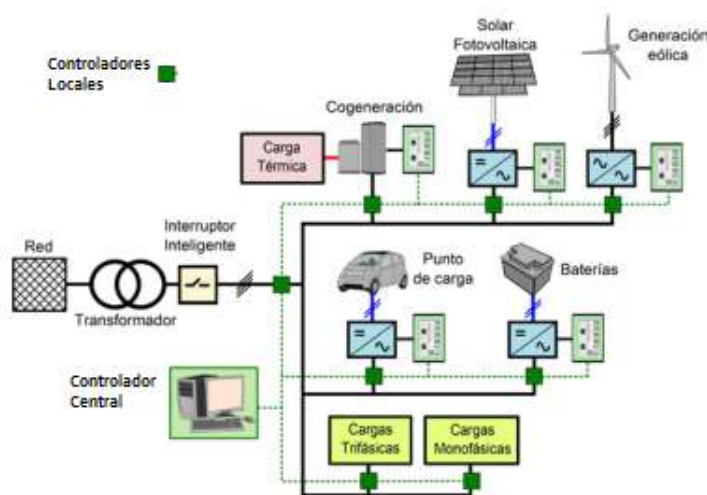


Figura 1. Esquema unifilar de una microrred genérica

### El concepto de emulación

Un emulador es un dispositivo que imita el comportamiento de un recurso real. Básicamente, se compone de dos partes, una capa de software y una de hardware. La capa de software calcula las variables de estado que mostraría el sistema real ante el mismo escenario. Una vez obtenidas las variables, éstas se aplican mediante la capa hardware con el objetivo de representar fielmente el comportamiento del sistema real representado.

La Figura 2a muestra un sistema de generación fotovoltaico convencional, formado por un panel y un convertidor AC/DC para su integración a red. Supóngase que se miden durante un cierto intervalo de tiempo la radiación solar y la potencia que genera la instalación.

En la Figura 2b se muestra una de las diferentes topologías de emulador fotovoltaico. En este caso, el sistema emulador intenta representar el funcionamiento de la instalación fotovoltaica de la Figura 2a, a nivel de potencia inyectada a red. Los datos de entrada al sistema de emulación son las medidas de radiación tomadas durante el experimento mostrado en la Figura 2a. En base a estos datos, la capa de software del emulador calcula la potencia que el sistema real estaría inyectando a red ante las mismas condiciones. Calculada dicha potencia, la capa hardware de emulación (convertidor) se encarga de convertirla en real. Evidentemente, para que el sistema de emulación pueda inyectar esta potencia a red, resulta imprescindible disponer de un sistema de alimentación.

Finalmente, en la Figura 2c se representan de forma teórica la potencia inyectada a red por ambos sistemas. Conceptualmente, las potencias deberían ser iguales, ya que asumiendo que los dos sistemas funcionan bajo las mismas condiciones, si los parámetros de configuración del sistema de emulación son correctos, la potencia inyectada por éste debería ser la misma que la del sistema real.

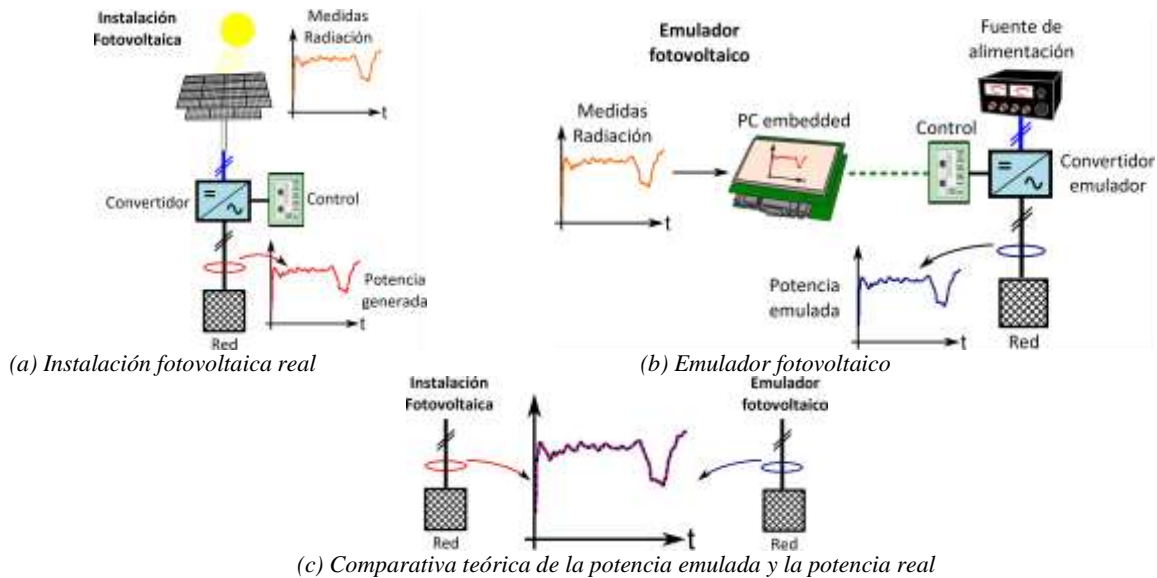


Figura 2. Emulación de un sistema fotovoltaico

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE LA MICRORRED

Una vez descrito el concepto de emulación, se presenta la estructura final de microrred desarrollada, que está formada por cuatro elementos (Figura 3) y presenta las siguientes características:

- Conexión a red: red de baja tensión monofásica
- Cargas monofásicas: es posible conectar todo tipo de cargas al sistema
- Controlador central: se emplea un PC embedded para definir los datos de entrada de la emulación y para calcular los perfiles de potencia que deben seguir cada uno de los emuladores (capa de software común para los diferentes emuladores).
- Emuladores: en base a los perfiles de potencia generados por el controlador central, inyectarán a red la potencia correspondiente (capa hardware de emulación).

A continuación se resume el funcionamiento de los tres emuladores utilizados en la implementación de la microrred y del controlador central.

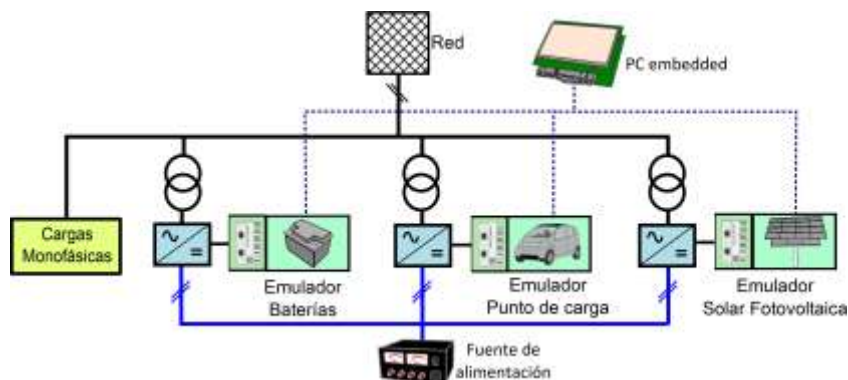


Figura 3. Esquema unifilar de la microrred implementada

#### Emulador fotovoltaico

El emulador fotovoltaico (*Emulador PV*) representa el comportamiento del panel junto con el del convertidor ondulador. Se considera que en todo momento se aplica sobre el panel un algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que permite extraer la máxima potencia del módulo. Las condiciones de radiación solar y localización, junto con los parámetros del módulo se introducen en el *PC embedded* que calcula la potencia que la instalación real estaría inyectando a red ante las mismas condiciones. Posteriormente, estos datos se van transfiriendo en tiempo real al sistema de electrónica de potencia que inyectará la potencia equivalente a la microrred.

## Emulador de punto de carga

El emulador de los vehículos eléctricos determina un perfil de potencias correspondiente al consumo del conjunto de vehículos que participan en la estación de carga. Estos vehículos se organizan en flotas cuyos horarios se conocen antes de empezar la simulación, y se especifican sus consumos medios, capacidades de la batería y potencia máxima de carga. La estación de carga consiste en un conjunto de cargadores con una potencia máxima y una eficiencia determinada.

Para determinar el consumo de los vehículos se lleva a cabo una simulación donde cada vehículo se considera por separado, y se aplica un algoritmo de gestión de cargas. El objetivo principal del algoritmo es poder satisfacer todas las necesidades de los vehículos y no se consideran otros objetivos como la minimización de los costes. El funcionamiento del algoritmo es el siguiente y se muestra en la figura 6:

- 0) La simulación empieza en el inicio del primer día, con las variables con el valor inicial definido en el PC embedded.
- 1) En primer lugar se determina el estado de carga mínimo que deberá tener cada vehículo al final del día, para garantizar la factibilidad del problema de gestión en los días futuros.
- 2) Para cada vehículo se calcula su índice de prioridad de carga, éste valor es función del período actual y del estado de carga de la batería y se calcula de la siguiente forma.

$$\text{Índice de prioridad de carga}_t = \max\left(\frac{n_{t+1}}{t_{t+1}}, \frac{n_{t+2}}{t_{t+2}}, \dots, \frac{n_T}{t_T}\right)$$

donde  $n_k$  son las necesidades de energía hasta  $k$  i  $t_k$  el tiempo que el vehículo está estacionado en la estación de carga hasta  $k$ .

- 3) En función del índice de prioridad de carga, se determinan qué vehículos tienen prioridad para conectarse y se les asigna un punto de carga en función de sus potencias máximas.
- 4) Se calcula la potencia consumida por cada punto de carga. Para éste cálculo se considera una estrategia de *Potencia constante – Tensión constante* para todos los vehículos, y la característica corriente-tensión de la batería se ha obtenido del modelo empírico propuesto en (Chen, 2006). La característica tensión-Estado de carga de la batería y la estrategia de carga se muestran a las figuras 4 y 5.

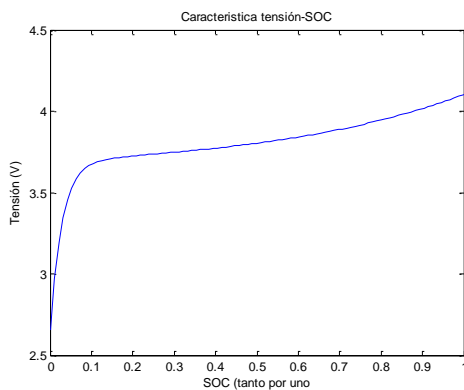


Figura 4. Característica Tensión- SOC de la batería

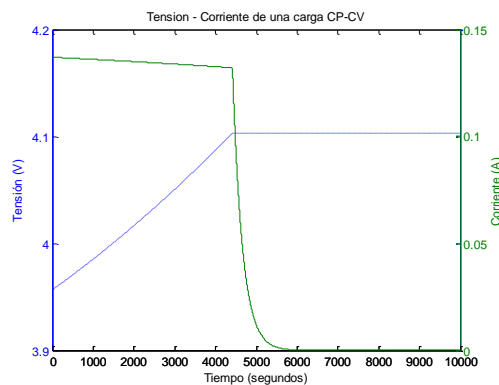


Figura 5. Estrategia de carga CP-CV

- 5) Con la potencia consumida se calcula la variación del estado de carga de los vehículos, y si se satisfacen los límites del estado de carga mínimo se pasa a la simulación del siguiente período con los valores actualizados.

Los vehículos se cargan siempre que pueden, hasta poder satisfacer todas sus necesidades energéticas. Cuando termina la simulación, se agregan los consumos de todos los vehículos para generar la curva de potencia del punto de carga, la cual se transforma en real mediante la capa de hardware.

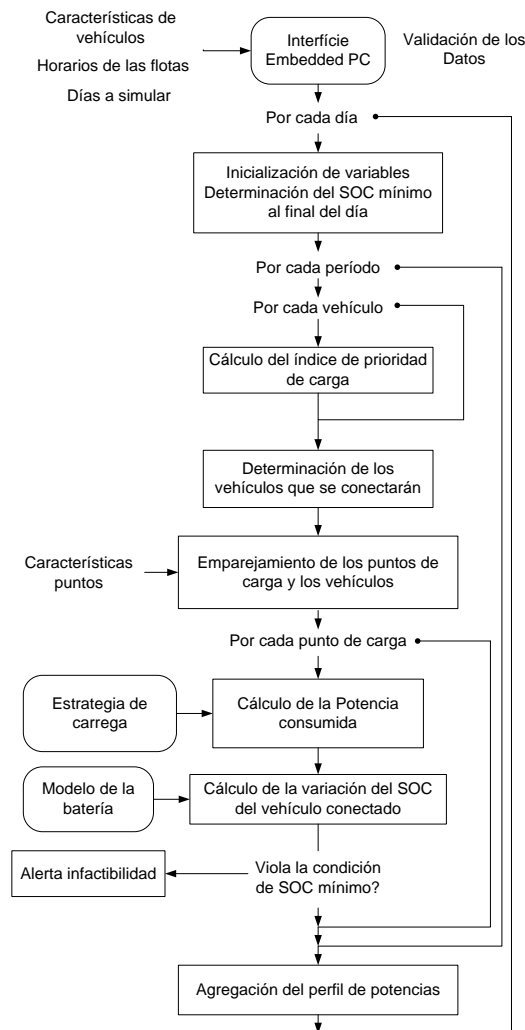


Figura 6. Esquema del algoritmo de gestión de cargas

## Emulador de baterías

El emulador de baterías (*Emulador BAT*) se controla de manera que pueda absorber o inyectar potencia en función de lo que se requiera. Se puede considerar un rendimiento tanto para la carga como para la descarga (considerando el convertidor de control y el proceso químico), así como el estado de carga inicial y actual de la batería. En función de la potencia inyectada/absorbida que defina la capa de software, la capa de hardware intercambiará la potencia correspondiente con la red.

## Controlador central

Una microrred, al igual que cualquier sistema de distribución eléctrica, tiene un alto nivel de complejidad debido a la variabilidad de las cargas y de la generación que pueden estar conectadas. Para garantizar las condiciones de operación adecuadas en todo momento es necesario un controlador central que gestione la energía. Este sistema es un software de control que permite coordinar toda la microrred adecuando la potencia de los diferentes elementos conectados en función de unas preferencias establecidas, e intercambiando potencia con la red de distribución cuando sea necesario. Éste sería el nivel alto de gestión, mientras que los controladores locales implantado en los convertidores serían el nivel bajo.

El controlador central tiene dos cometidos principales:

- Interaccionar con el sistema eléctrico y utilizarlo para decidir el modo de funcionamiento, aislado o conectado, en el que es más favorable trabajar.



- Gestión de la microrred, recibiendo la información de los sistemas del nivel inferior; tomar las decisiones oportunas, y enviar las órdenes a los diferentes elementos del nivel bajo según sea conveniente.

Para llevarlos a cabo, se pueden identificar tres tareas:

- La primera tarea se basa en optimizar el intercambio de energía según las necesidades propias y del mercado, y trabajar en condiciones seguras frente a posibles faltas en cualquiera de las dos redes.
- La segunda se encarga de organizar los recursos energéticos entre los generadores, las cargas y los elementos de almacenaje dentro de la microrred. Para ello utiliza funciones objetivo basadas en la optimización de distintas variables, como por ejemplo, la minimización de pérdidas, la minimización de costes o la maximización de beneficios entre otras.
- Los controladores locales, situados en el nivel más bajo, se encargan de enviar las órdenes oportunas a los elementos bajo su mando. Estos elementos pueden ser convertidores de potencia asociados a elementos de generación y consumo, o interruptores que pueden aislar toda o parte de la red. Los controladores locales son capaces de tomar sus propias decisiones, aunque éstas están sujetas a las restricciones que se les han indicado desde el controlador central.

## MICRORRED EXPERIMENTAL

La Figura 7 muestra la implementación real de la microrred. En la imagen de la derecha se observan los tres emuladores (encuadrados en azul) y la fuente de alimentación (encuadrada en verde), que permite a los emuladores trabajar de forma bidireccional. También se pueden ver el controlador central, representado mediante el *PC embedded*, donde está implementada la capa de software de la emulación y los transformadores, inductivos y aparamenta necesarios para que el sistema funcione adecuadamente.



Figura 7. Montaje final de la microrred implementada

### Controladores locales

Los convertidores tienen implementado dos controles locales. Un primer control regula la potencia activa y reactiva que cada convertidor debe entregar o consumir (Figura 8.a); mientras que el segundo control (Figura 8.b) regula la tensión del bus de continua para que se mantenga constante en un valor de 400 V.

### Controlador central

El dispositivo de gestión central, un *PC-embedded*, lleva a cabo el control a alto nivel, gestiona el comportamiento de los convertidores y permite la comunicación de la plataforma con el exterior. El intercambio de consignas y lecturas tanto de potencia activa como reactiva entre el *PC embedded* y los convertidores se realiza a través del protocolo CAN.

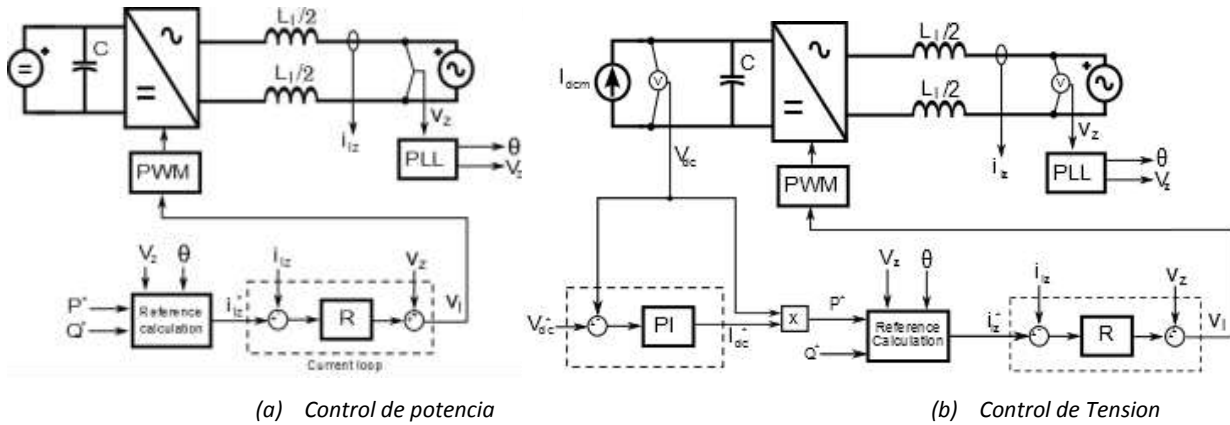


Figura 8. Controles de los convertidores

### 3. CASO DE ESTUDIO

Para ilustrar el funcionamiento de la microrred se ha diseñado un experimento en el cual se utilizan los tres emuladores incluidos en la plataforma. Tomando como base el esquema de la Figura 3, el experimento trata de emular el funcionamiento de un punto de carga de vehículos eléctricos en combinación con un sistema de generación fotovoltaico. Además se incorpora una batería al sistema, como medida de soporte, para almacenar excedentes de energía fotovoltaica cuando el consumo del punto de carga sea reducido y para dar potencia de apoyo cuando varios coches estén recargando las baterías y la potencia de los paneles no sea suficiente.

#### Definición del escenario

A continuación se expone de forma breve la configuración que se ha llevado a cabo de los emuladores:

- Emulador fotovoltaico: introduciendo los datos de radiación, localización y los parámetros del panel, se obtiene que el sistema real seguiría un perfil de potencia como el de la Figura 9.a.
- Emulador de punto de carga: se define una flota de vehículos públicos, formada por 5 coches públicos: dos ambulancias, dos coches de policía y un coche oficial. En base a la configuración del emulador de punto de carga, éste mismo gestiona de forma autónoma la carga de vehículos. En base a estas condiciones se obtiene el perfil de potencia de la Figura 9.b.
- Emulador de Batería: Se encarga de absorber los excedentes de la generación fotovoltaica y de inyectarlos cuando sea necesario, para dar soporte a la carga de vehículos eléctricos. Se presupone un estado de carga y una capacidad suficientes para que la batería no se descargue en ningún momento durante la emulación. Por tanto, simplemente midiendo la potencia que consume el punto de carga y la que generan los paneles, se calcula la diferencia que debe inyectar o absorber para conseguir un balance neto con la red.
- Cargas monofásicas: No se consideran otras cargas durante el experimento

La configuración del escenario se ha realizado con el *PC embedded* tal como muestra la Figura 10.

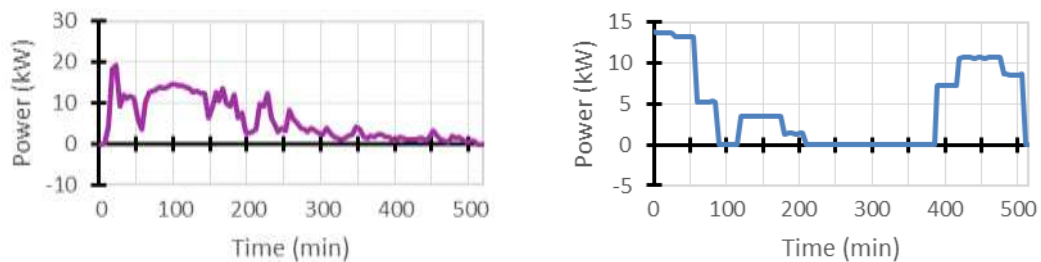
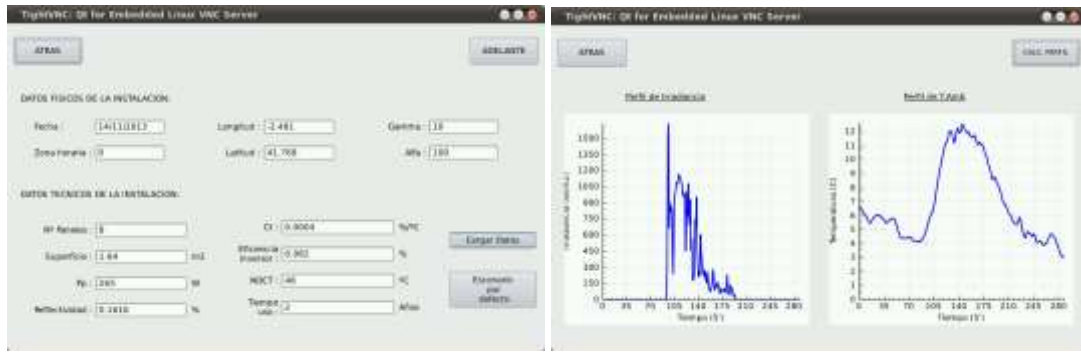


Figura 9. Perfiles de potencia calculados



(a) Instalación fotovoltaica



(b) Punto de carga de vehículos eléctricos

Figura 10. Pantallas de configuración de los emuladores

Una vez calculados los perfiles de potencia fotovoltaica y de punto de carga calculados en el *PC embedded*, las potencias correspondientes se transmiten a tiempo real hacia los convertidores emuladores que las inyectarán a red. En cuanto al emulador de baterías, su capa software, mide la potencia intercambiada por el emulador fotovoltaico y por el punto de carga, y calcula la potencia que deberá inyectar o absorber la batería para que la potencia intercambiada con la red sea nula.

Nótese que los perfiles calculados corresponden aproximadamente a 8 horas (500 minutos). La plataforma también ofrece la posibilidad de realizar emulaciones aceleradas en el tiempo, de forma que un experimento como el del ejemplo se pueda realizar en tiempo reducido. En este caso, se decide recrear el escenario de emulación correspondiente a 8 horas, en tan solo 8 minutos. Así, es posible observar el comportamiento que tendría el sistema a lo largo de un tercio del día.

## Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos, después de aplicar los perfiles de potencia a los emuladores y el correspondiente control de carga/descarga de la batería. La Figura 11 muestra una captura de osciloscopio de las corrientes de fase que circulan por el sistema. Nótese que la duración real del experimento son 500s (50 s/div), ya que se ha acelerado la emulación (1 minuto equivale a 1 segundo de emulación). Las corrientes medidas son las que circulan por los diferentes emuladores (Emulador PV: magenta, emulador punto de carga: azul y emulador de batería: verde).

Para comprender mejor el funcionamiento del sistema, se debe realizar el cálculo de la potencia activa que intercambian cada uno de los convertidores dentro de la microrred. Nótese que al trabajar con convertidores monofásicos, la potencia que intercambian con la red no es constante por lo que se debe trabajar con el valor medio de esta, tal y como se muestra en la Figura 12. En ella se observa como la evolución de las potencias de los emuladores de punto de carga y fotovoltaico siguen los perfiles generados por su capa de software de forma satisfactoria. En cuanto a la batería, se aprecia como en todo momento cumple su objetivo de compensar el balance energético, absorbiendo energía cuando hay excedente fotovoltaico (Intervalo entre 250-350 min.) y al contrario cuando el punto de carga necesita más potencia de la generada (Intervalo 25-60).





Figura 11. Captura de las diferentes corrientes del sistema

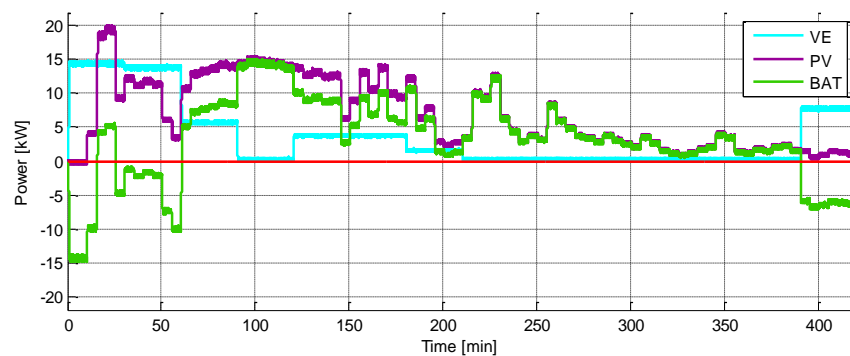


Figura 12. Cálculo de las potencias inyectadas por los convertidores

## CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado el diseño, la implementación y el funcionamiento de una microrred de laboratorio creada para desarrollar experimentos con sistemas que incorporen energías renovables. Se ha presentado el concepto de emulación y se han descrito los diferentes emuladores incluidos en la plataforma. Por último, se ha presentado un experimento en el que se muestra la operación de los tres sistemas de emulación, validando su buen comportamiento y operación. A modo de conclusión, simplemente comentar que la flexibilidad de la plataforma permitirá que pueda utilizarse como base para futuros experimentos permitiendo incluso la incorporación de nuevos nodos o emuladores.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto IPT-2011-1892-920000.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lasseter, R.H. Microgrids. In Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, volume 1, pages 305–308 vol.1, 2002.
- Lasseter, R.H., Eto, J.H., Schenkman, B., Stevens, J., Vollkommer, H., Klapp, D., Linton E., Hurtado H., and Roy J. Certs microgrid laboratory test bed. Power Delivery, IEEE Transactions on, 26(1):325–332, 2011.

- Min Chen, Min; Rincón Mora, Gabriel A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. IEEE transactions on energy conversion, vol. 21, no. 2, june 2006
- Prasenjit Basak S. Chowdhury S. Halder nee Dey and S.P. Chowdhury. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews. IET renewable energy series. The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- Ruiz-Alvarez, A., Colet-Subirachs, A., Alvarez-Cuevas Figuerola, F., Gomis-Bellmunt, O., and Sudria-Andreu, A. Operation of a utility connected microgrid using an iec 61850-based multi-level management system. Smart Grid, IEEE Transactions on, 3(2):858–865, 2012.